

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА АККРЕЦИОННЫХ ДИСКОВ В КАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЕЗДАХ: ТЕОРИЯ И НАБЛЮДЕНИЯ

Д. А. Кононов

Институт астрономии Российской академии наук

В обзорной лекции будут представлены результаты теоретических и наблюдательных исследований структуры течения в аккреционных дисках катаклизмических переменных звезд. В первой части лекции дано описание тех элементов течения, которые выявлены в результатах численного газодинамического моделирования и подтверждены посредством фотометрических и спектральных наблюдений. Во второй части лекции описаны методы наблюдений самых внутренних областей диска, которые могут быть использованы для наблюдательного подтверждения существования элементов, известных до сих пор только в результатах моделирования. В частности, будет представлен метод для непосредственного наблюдения спиральной прецессионной волны плотности.

THE INNER STRUCTURE OF ACCRETION DISKS IN CATACLYSMIC VARIABLE STARS: THEORY VS OBSERVATIONS

D. A. Kononov

The Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences

In this review we present the current results of theoretical and observational studies of the flow structure in the accretion disks of cataclysmic variable stars. The first part of the review is focused on the flow elements that are well described by computer gas dynamical simulations and confirmed by photometric and spectroscopic observations. The second part is on the perspective observational methods that allow one to resolve the very inner regions of the disk. In particular we present a method that should allow observing the precessional spiral density wave as a spiral pattern.

Введение

Катаклизмические переменные звезды представляют собой тесные двойные системы, состоящие из белого карлика (далее — аккректор) и звезды позднего спектрального класса, заполняющей свою полость Роша (далее — донор). В результате заполнения полости Роша звездой-донором начинается перетекание вещества с ее поверхности в окрестности внутренней точки Лагранжа в полость Роша звезды-аккректора, что приводит к возникновению в полости Роша звезды-аккректора разнообразных потоков, струй, газовых дисков.

Исследования структуры течения в катаклизмических переменных звездах начались более пятидесяти лет назад. В частности, еще до развития методов численного газодинамического компьютерного моделирования, в конце 60-х гг. XX в., Горбацким [1] и Смаком [2] были выдвинуты предположения о том, что горб на кривой блеска катаклизмической переменной звезды, наблюдаемый перед главным затмением, может быть обусловлен наличием ударной волны в месте взаимодействия аккреционного диска со струей вещества из внутренней точки Лагранжа. Впоследствии это предположение полностью подтвердилось и в результатах моделирования, и в спектроскопических наблюдениях.

С развитием компьютерной техники начались активные исследования структуры течения в катаклизмических переменных посредством численного газодинамического моделирования. Уже в середине 80-х гг. XX в. были выполнены двумерные расчеты с помощью сеточных методов (см., например, [3]), которые позволили выявить такие элементы течения, как приливные ударные волны в дисках. В 1988 г. Томом Маршем и Кейтом Хорном [4] был разработан метод доплеровской томографии, который позволил значительно более детально изучить структуру течения с наблюдательной точки зрения.

В настоящее время, благодаря развитию вышеупомянутых методов теоретического и наблюдательного исследования, мы имеем достаточно детальное представление о том, что происходит со структурой течения вокруг звезды-аккректора в катаклизмических переменных звездах. Однако часть выявленных в теории феноменов до сих пор нуждается в прямом наблюдательном подтверждении. В данной обзорной лекции будут описаны как хорошо известные на данный момент газодинамические элементы, наличие которых в реальных системах подтверждено наблюдательно, так и элементы, предполагаемое проявление которых наблюдается пока только косвенно. Кроме

того, будут представлены перспективные методы наблюдений, которые позволят более детально исследовать самые внутренние области аккреционных дисков.

Структура течения в тесной двойной системе

Согласно многочисленным результатам газодинамического моделирования (см., например, [5, 6]) структура течения в немагнитной катаклизмической переменной звезде состоит из аккреционного диска и ряда газодинамических возмущений в этом диске (рис. 1).

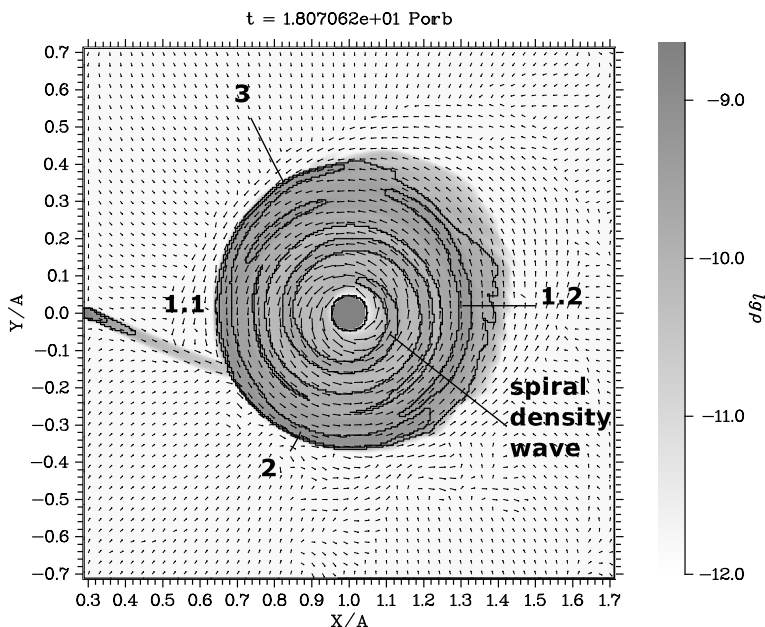


Рис. 1. Модельное распределение плотности в экваториальной плоскости тесной двойной системы. Маркерами показаны основные элементы течения: 1.1 и 1.2 — рукава приливной ударной волны; 2 — «горячая линия»; 3 — отошедшая ударная волна. Также на рисунке хорошо выделяется прецессионная спиральная волна плотности во внутренней части диска

Основными газодинамическими возмущениями являются ударные волны: «горячая линия» (обозначена цифрой 2 на рис. 1) — ударная волна, возникающая в результате взаимодействия вещества

диска со струей из внутренней точки Лагранжа; два рукава приливной ударной волны (1.1 и 1.2 на рис. 1), а также отошедшая ударная волна (цифра 3 на рис. 1), возникающая перед диском вследствие его орбитального движения в газе межкомпонентной оболочки. Наличие всех трех упомянутых выше ударных волн подтверждено, в том числе и наблюдательно. Так, например, как уже было сказано во введении, об ударной волне в месте взаимодействия струи и диска ученые догадались еще в конце 60-х гг. прошлого века, анализируя кривые блеска катаклизмических переменных звезд. Позднее результаты численного моделирования позволили уточнить структуру этой волны, первоначально названной горячим пятном, и показать, что на самом деле это целая система ударных волн, тянущаяся на достаточно большое расстояние вдоль края диска. Поэтому в данной лекции мы называем ее горячей линией. Кроме того, результаты доплеровской томографии также показывают протяженное яркое образование в том месте, где струя взаимодействует с диском. Также результаты доплеровской томографии позволили подтвердить наличие рукавов приливной ударной волны и отошедшей ударной волны в аккреционных дисках катаклизмических переменных (рис. 2).

Кроме вышеперечисленных ударных волн на рис. 1 во внутренних областях аккреционного диска хорошо выделяется еще один элемент течения. Это прецессионная спиральная волна плотности, которая была открыта в теоретических работах (см., например, [7]). Формируется эта волна в результате приливного воздействия звезды-донора на линии тока в аккреционном диске. Согласно выводам авторов (ссылки) под действием приливных сил возникает ретроградное апсидальное движение линий тока. Причем угловая скорость этого движения зависит от размера большой полуоси линии тока: чем больше размер полуоси, тем выше угловая скорость. В итоге с течением времени формируется структура, показанная на рис. 3.

На рис. 3 хорошо видно, что линии тока касаются друг друга в точках, близких к их апоастрам. Поскольку в апоастре скорость течения газа самая низкая, плотность, согласно закону сохранения массы, должна быть, наоборот, самой высокой. В итоге в структуре течения формируется спиральный узор (волна плотности), который ретроградно прецессирует. Согласно результатам последних теоретических исследований (см., например, [8–10]) прецессионная волна плотности представляет собой весьма важный элемент течения, который отвечает за возникновение множества физических эффектов и, возможно, наблюдательных проявлений катаклизмических пере-

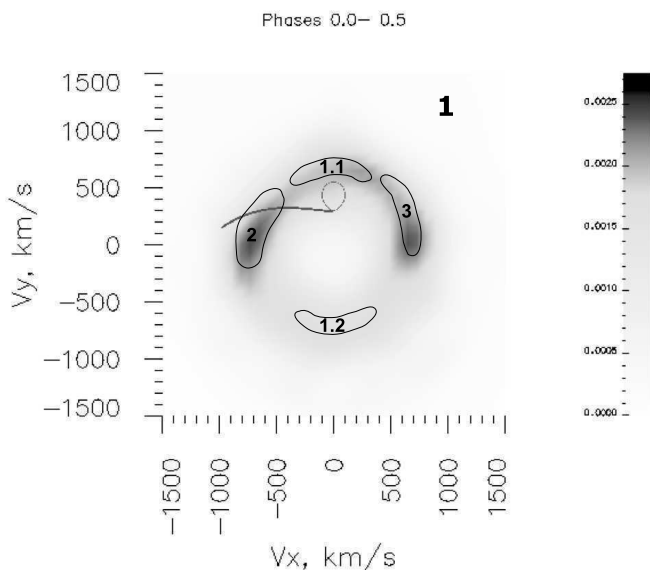


Рис. 2. Соответствие между положениями ударных волн. Обозначение ударных волн соответствует рис. 1

менных звезд. Однако она же является одним из тех элементов течения, наличие которых до сих пор не подтверждено прямыми наблюдениями. В частности, эта волна не может быть обнаружена в результатах доплеровской томографии — одного из самых мощных методов наблюдательного исследования катаклизмических переменных, поскольку этот метод требует, чтобы картируемые элементы течения покоились в системе координат, вращающейся вместе с двойной системой. Многочисленные исследования показывают, что описанные выше ударные волны действительно покоятся во вращающейся системе координат. В то же время прецессионная волна плотности, ввиду своей физической природы, за один орбитальный период совершает во вращающейся системе чуть более одного полного оборота в направлении, обратном орбитальному вращению двойной звезды. Поэтому для наблюдательного подтверждения ее существования требуется модернизация имеющихся методик наблюдения, о которой пойдет речь в следующем разделе.

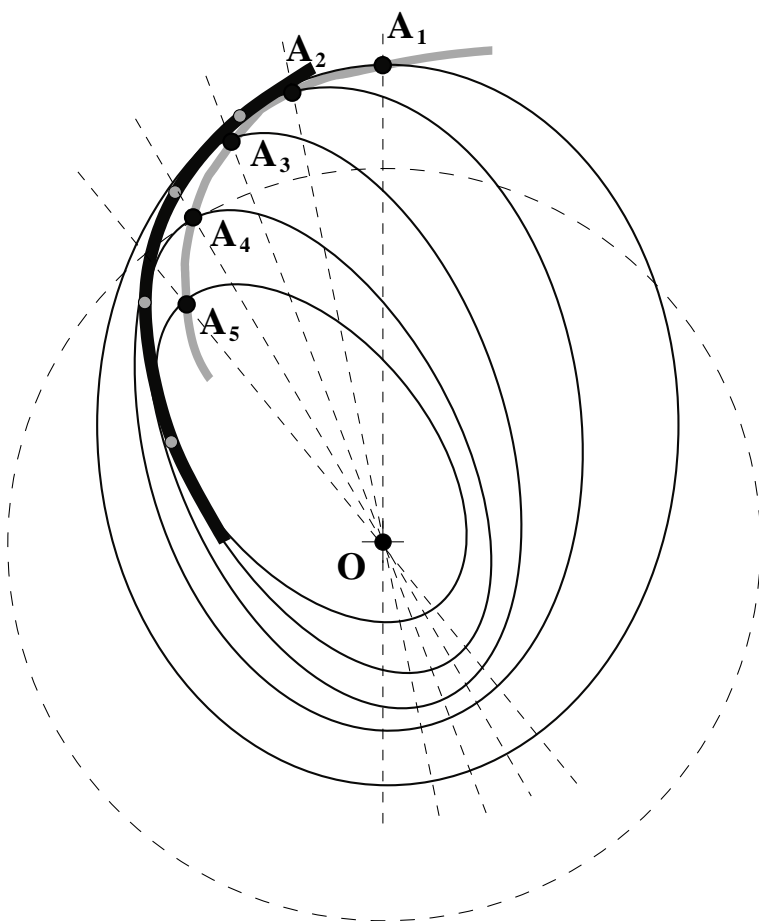


Рис. 3. Схематическое изображение формирования спиральных структур во внутренних газодинамически невозмущенных частях аккреционного диска

Метод непосредственного наблюдения прецессионной волны плотности

Как уже отмечалось выше, одним из наиболее действенных методов визуализации элементов течения в аккреционных дисках катаклизмических переменных звезд является метод доплеровской томо-

графии [4]. Именно с помощью этого метода успешно наблюдаются основные ударные волны в дисках. Однако непосредственное применение метода доплеровской томографии для наблюдения прецессионной волны плотности невозможно по следующим причинам. По самому определению метода на результирующих томограммах отображаются только те элементы течения, которые покоятся в системе координат, вращающейся вместе с двойной звездой. И если для упомянутых ударных волн это условие соблюдается, то прецессионная волна плотности, ввиду характера ее ретроградного движения, за один орбитальный период делает чуть больше одного полного оборота во вращающейся системе координат. Таким образом, при построении доплеровской томограммы по спектральным данным, полученным в течение одного орбитального периода системы, вклад прецессионной волны в томограммы будет полностью размыт.

Однако вклад прецессионной волны все же можно выделить в профилях линий.

Согласно описанию волны плотности (например, [7]), период ее прецессии в системе координат наблюдателя (лабораторной системе) составляет десятки (и даже, в некоторых случаях, сотни) орбитальных периодов системы. Таким образом, за один орбитальный период для наблюдателя волна смещается на незначительный угол в направлении, противоположном орбитальному движению.

Допустим сначала, что в диске отсутствует волна плотности. Тогда два профиля спектральной линии, полученные на одной и той же орбитальной фазе с разницей в один орбитальный период (для простоты положим на $\phi = 0.0$ и на $\phi = 1.0$) не должны отличаться друг от друга, поскольку все элементы течения, покоящиеся во вращающейся системе координат, через один орбитальный период возвращаются в исходное положение. В то же время если в системе присутствует прецессионная волна плотности, то два упомянутых профиля будут отличаться друг от друга вследствие того, что за один орбитальный период в лабораторной системе координат волна плотности сместилась на некоторый угол.

Описанный выше эффект может быть положен в основу следующего относительно простого метода выделения вклада прецессионной волны в профили спектральных линий:

- необходимо провести наблюдения профилей спектральных линий системы на одних и тех же фазах (скажем, $\phi_1 = 0.0$, $\phi_2 = 1.0$, $\phi_3 = 2.0$ и т. д.) в течение достаточно длительного периода (в идеале — прецессионного периода волны плотности).

Каждый из наблюдаемых профилей в таком случае будет отличаться от остальных именно вкладом прецессионной волны ввиду ее отличного положения на каждом следующем обороте системы;

- далее необходимо усреднить все полученные профили, чтобы получить профиль, свободный от вклада прецессионной волны и обусловленный исключительно элементами, покоящимися во вращающейся системе координат;
- наконец, путем вычитания среднего профиля из каждого индивидуального получить остаточные профили, которые обусловлены исключительно прецессионной волной плотности.

Полученные в результате описанной выше операции остаточные профили, обусловленные вкладом прецессионной волны плотности, теперь можно рассматривать как томографические проекции этой волны с тем лишь отличием, что для восстановления томограммы волны нужно использовать не орбитальный период системы, а прецессионный период волны. Фазовые углы ϕ проекций волны необходимо пересчитать с учетом прецессионного периода.

Для проверки работоспособности метода проведено численное моделирование тесной двойной системы с параметрами V455 And. По распределению плотности в аккреционном диске системы для одного из моментов времени после выхода решения на квази-стационарный режим течения, в смысле сохранения полной массы в вычислительной области, (см. рис. 1) хорошо видно, что во внутренних областях диска отчетливо выделяется прецессионная волна плотности.

Для моделирования процесса наблюдений нами были использованы более 20 моментальных распределений газодинамических параметров системы, последовательно отстоящих друг от друга ровно на один орбитальный период. С использованием этих распределений смоделированы профили спектральных линий и выделены вклады прецессионной волны в каждый из этих профилей. Для определения прецессионного периода волны плотности были построены кривые лучевых скоростей остаточных профилей. В результате аппроксимации кривой лучевых скоростей синусоидой был определен прецессионный период волны $P_{pr} = 12.709 P_{orb}$. Здесь нужно отметить, что при моделировании прецессионный период получился значительно короче, чем реально наблюдаемые периоды. Такой результат требует дополнительного исследования самого процесса газодинамического моделирования, однако никоим образом не меняет выводов данной работы и не нарушает условия описанного выше метода.

Будем обозначать орбитальные фазы системы буквой ϕ , а фазовые углы прецессионной волны относительно прецессионного периода ϕ . Поставим в соответствие $\phi = 0.1P_{orb}$ нулевой фазовый угол волны $\phi = 0$. Остальные фазовые углы остаточных профилей в таком случае вычисляются исходя из определенного прецессионного периода. Далее, с использованием информации о фазовых углах прецессионной волны в моменты наблюдений с использованием остаточных профилей построим доплеровские томограммы.

На рис. 4 показана томограмма прецессионной волны плотности в том положении, какое она занимала относительно других элементов системы (в частности, звезды донора и струи из точки L_1), когда система «наблюдалась» на орбитальной фазе $\phi = 0.1P_{orb}$.

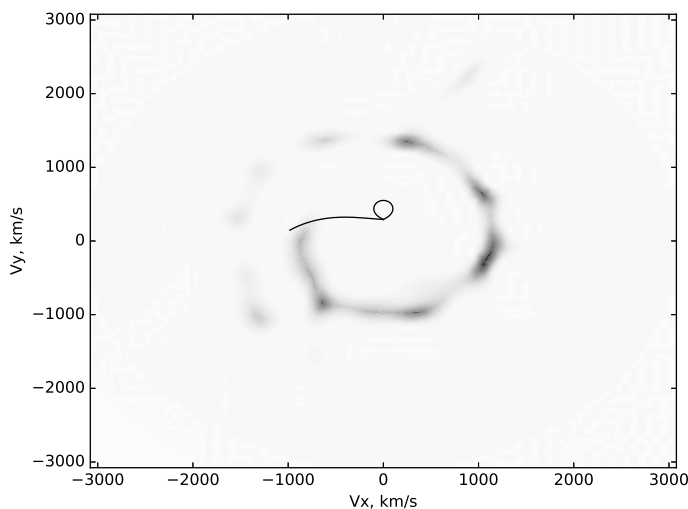


Рис. 4. Томографическое изображение прецессионной волны плотности в том положении, которое она занимала относительно основных элементов системы на орбитальной фазе $\phi = 0.1P_{orb}$. Линиями показаны контур полости Роша в орбитальной плоскости в скоростных координатах и траектория струи вещества из точки L_1

Заключение

В обзорной лекции представлены современные данные о структуре течения в немагнитных катаклизмических переменных звездах. Рассмотрены структура аккреционного диска и теоретические и наблюдательные методы, которые позволили исследовать ее детально. Также в лекции представлен метод, позволяющий наблюдать прецессионную волну плотности в аккреционном диске катаклизмической переменной звезды непосредственно в виде спирали. Для проверки метода проведено моделирование процесса наблюдений с использованием результатов численных газодинамических расчетов. Построены синтетические профили спектральных линий, определены вклады прецессионной волны в каждый индивидуальный профиль в зависимости от фазы наблюдений двойной системы. Определен прецессионный период волны и построены ее томографические изображения для различных моментов времени.

Результаты работы показывают, что для качественного спектрального материала с использованием предложенного метода возможно наконец получить непосредственное наблюдательное подтверждение существования прецессионной волны плотности.

Библиографические ссылки

1. Горбачук В. Г. The Effects of Gaseous Jets in Close Binary Systems // Астрофизика. — 1967. — Т. 3. — С. 245.
2. Smak J. Erruptive Binaries I. Hot Spots and Distortions of the Radial Velocity Curves // Acta Astron. — 1970. — Vol. 20. — P. 312.
3. Sawada K., Matsuda T., Hachisu I. Spiral shocks on a Roche lobe overflow in a semi-detached binary system // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1986. — Vol. 219. — P. 75.
4. Marsh T. R., Horne K. Images of accretion discs. II - Doppler tomography // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 1988. — Vol. 235. — P. 269—286.
5. Bisikalo D. V. Numerical Modeling of Mass Transfer in Close Binaries // Astrophys. Space. Sci. — 2005. — Vol. 296. — P. 391.
6. Bisikalo D. V., Kononov D. A., Kaigorodov P. V. et al. The matter-flow structure in the SS Cyg system in its quiescent state from comparisons of observational and synthetic Doppler tomograms // Astrophys. Space. Sci. — 2008. — Vol. 52. — P. 318.

7. *Bisikalo D. V., Boyarchuk A. A., Kaigorodov P. V. et al.* Formation of the “precessional” spiral wave in the cool accretion disk in semidetached binaries // AIP Conference Proceedings. — 2005. — Vol. 797. — P. 295.
8. *Kaygorodov P. V., Bisikalo D. V., Kuznetsov O. A., Boyarchuk A. A.* Superhumps in binary systems and their connection to precessional spiral density waves // Astr. Rep. — 2006. — Vol. 50. — P. 537.
9. *Bisikalo D. V., Kurbatov E. P., Kaygorodov P. V.* Precessional Density Wave as a Reason of Turbulence in Accretion Disks of Non-magnetic Close Binary Stars // Astronomical Society of the Pacific. — 2015. — Vol. 498. — P. 41.
10. *Kononov D. A., Bisikalo D. V., Puzin V. B. et al.* A possible mechanism for the formation of humps in the orbital light curves of WZ Sge cataclysmic variable stars // Astr. Rep. — 2015. — Vol. 59. — P. 191.